

基于模糊自整定参数 PID 控制的铝合金 薄板脉冲 MIG 焊

张晓莉^{1,2}, 李钰桢¹, 龙 鹏¹, 薛家祥¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640; 2. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 针对铝合金薄板脉冲 MIG 焊, 提出了一种比例积分微分 (proportion integral derivative, PID) 参数模糊自整定控制方法, 文中介绍了其原理及设计思路, 将模糊逻辑控制器引入已建立的 PID 控制器的 Simulink 仿真模型, 实现了 PID 参数模糊自调节, 并进行了输入适应性对比试验和抗干扰试验分析, 表明 PID 参数模糊自整定控制器在输入适应性和抗干扰方面更胜一筹, 能进一步提高弧焊电源性能。最后对铝合金 1 mm 薄板进行了传统 PID 控制和模糊自整定参数 PID 控制焊接试验对比。结果表明, 该方法焊缝光亮、飞溅少、焊接过程比较平稳, 可获得较好的焊缝质量和稳定的焊接过程。

关键词: 铝合金薄板; PID 控制; 模糊自整定; MIG 焊

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)11-0083-05



张晓莉

0 序 言

铝合金与传统金属相比, 焊接工艺性能具有热导率大、易氧化、材质较软、热强性低、气孔率高等显著特点, 尤其对于铝合金薄板而言, 由于母材尺寸的限制, 上述特点在实际焊接过程中体现更为明显, 其对于焊接能量输入有着较高的敏感性, 焊接能量输入不适将极易导致铝合金焊接的缺陷, 因此在焊接过程中对输入能量的控制是铝合金焊接技术研究的关键^[1]。脉冲 MIG 焊是目前国内外广泛采用的一种铝合金焊接方法^[2]。

传统 PID 控制技术参数一旦确定, 在整个控制过程中 PID 参数就不能随系统传递函数的变化进行调整, 而对脉冲 MIG 焊这样一种复杂时变非线性的过程, 固定 PID 参数难以实现系统最佳控制^[3]。文献^[4]中把传统 PID 控制和先进的专家系统相结合, 通过计算机自动调整 PID 参数, 实现智能 PID 控制, 但专家经验有时难以精确描述, 控制过程中各种信号量及评价指标不易定量表示, 再加上电弧产生的复杂性, 对于焊接过程的认识与经验尚有部分仍无法进行定量的精确描述, 很难实现精确控制。

文中利用模糊数学的基本理论和方法, 将已有的非定量专家经验表述为模糊规则, 根据模糊规则进行推理, 实现非定量经验对量化数据的控制, 克服了固定 PID 参数控制器对输入控制的局限性, 保证控制步骤的准确性, 减少焊接过程中未知状态对焊接的影响, 尽可能在焊接过程中对能量进行更为精细的控制, 加强了控制的自动化与智能化^[5,6]。

1 PID 参数模糊自整定的原理

图 1 为 PID 参数模糊自整定控制器结构, 电流反馈信号与给定信号比较, 得到偏差信号 e 以及偏差变化量 e_c , 将其作为 PID 参数模糊自整定控制器的输入, 根据任意时刻 e 和 e_c 对 PID 参数进行调整, 保证 PID 参数整定的实时性和针对性。自整定过程是通过将 e 和 e_c 输入的模糊化、模糊规则推理化过程和对输出结果的解模糊化 3 部分来完成的。在模糊化与解模糊过程中需根据实际经验和控制要求规定输入与输出信号各子集的隶属度和模糊控制模型。模糊控制器中的模糊规则表采用 Mamdani 规则编制。模糊规则表描述在 PID 参数整定过程中比例系数 K_p , 积分系数 K_i , 微分系数 K_d 与 e 和 e_c 之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 e_c , 根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改, 以满足不同 e 和 e_c 时对控制参数的要求, 保证被控对象有良好

收稿日期: 2013-08-02

基金项目: 广东省特派员工作站资助项目(2010B090500008); 佛山市科技计划资助项目(2011AA100175); 黄埔区科技计划资助项目(201341)

的动、静态性能。

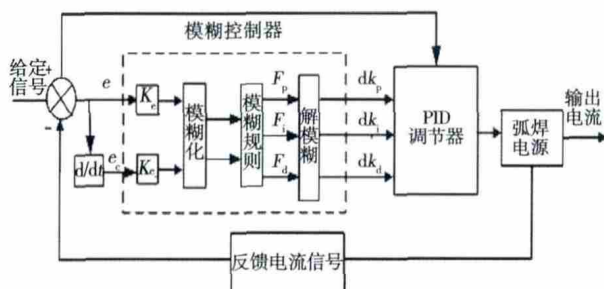


图1 PID参数模糊自整定控制器结构

Fig. 1 Structure of PID parameter fuzzy self-tuning controller

以比例系数 K_p 为例,将经过模糊规则推理输出的模糊调节量 $F(e_i, e_{ci})_p$ 经过量化因子解模糊,控制 PID 参数调节量 dK_p ,用调节量调节前一次 PID 参数 $K_p(n-1)$,得 PID 参数 $K_p(n)$ 则达到 PID 参数自整定的效果。上述过程如式(1)和式(2)所示,即

$$dK_p = K_p F(e_i, e_{ci})_p \quad (1)$$

$$K_p(n) = K_p(n-1) + dK_p \quad (2)$$

积分系数 K_i 与微分系数 K_d 同理可得。通过对 PID 参数进行调节可得第 n 次采样点的控制量 $u(n)$ 为

$$u(n) = K_p(n) e(n) +$$

$$K_i(n) \sum_{i=0}^n e(n) + K_d(n) [e(n) - e(n-1)] \quad (3)$$

2 PID参数模糊自整定控制器设计

2.1 模糊化与解模糊量化因子的选择

模糊控制器的两个输入量中,偏差 e 为 12 位 A/D 转换通道采集反馈量与给定数值量差值,理论范围为 $[-4096, +4096]$,但在铝合金薄板焊接时电流一般在 $50 \sim 350$ A 左右,因此可设定偏差连续域为 $[-3000, +3000]$,偏差变化量 e_c 的论域设为 $[-6 \times 10^9, 6 \times 10^9]$ 。根据传统 PID 控制器尝试所得的 PID 参数所得经验,输出 dK_p 的论域设为 $[0, 6]$,输出 dK_i 的论域设为 $[0, 80]$,输出 dK_d 的论域设为 $[0, 0.001]$ 。令所有输入输出量的模糊域统一取值为 $[-6, 6]$,可离散为从 $-6 \sim +6$ 13 个整数等级,对应的模糊子集为 $e, e_c = \{ \text{NB(负大)}, \text{NM(负中)}, \text{NS(负小)}, \text{ZO(零)}, \text{PS(正小)}, \text{PM(正中)}, \text{PB(正大)} \}$ 。连续域与模糊域之间量化因子的计算分为两种情况,若连续域与模糊域都对称,则量化因子为

其取值边界的绝对值之商,如 $K_e = 6/3000 = 0.002$,而 $K_{e_c} = 1 \times 10^{-9}$;若连续域不对称则量化因子为两域区间范围之比,如 $K_p = (6-0) / [6 - (-6)] = 0.5$,而 $K_i = 6.7, K_d = 0.00083$ 。

2.2 隶属函数的确定

隶属函数一般采用三角形隶属函数。对实际控制而言,为提高控制的准确度和灵敏度,可以将调节的重点放在出现率较高的偏差范围,试验说明 e 和 e_c 的变化范围在 $[-3, 3]$ 区间比较集中,因此在偏差较大而不常出现的部分,隶属函数可以设计得平缓;而在 e 和 e_c 与零更为接近的范围,则需要调节更加灵敏,隶属区间对应数值的针对性加强,隶属函数的形状变化则更陡。图2为输入偏差 e 的隶属函数曲线。

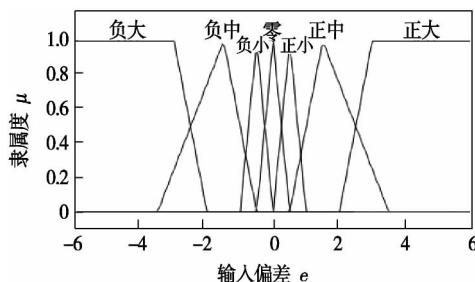


图2 输入偏差 e 隶属函数曲线

Fig. 2 Curve of input e membership function

2.3 模糊规则设计

模糊规则的设计从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑,表1、表2、表3是工程设计人员根据 PID 参数 K_p, K_i, K_d 在系统中的作用对 PID 参数整定经验进行归纳总结,并结合在不同的 e 和 e_c 时,被控过程对参数 K_p, K_i, K_d 的自整定要求建立的模糊规则表,其对于任意一种 e 和 e_c 组合所对应的 K_p, K_i, K_d 参数调整的方法都进行了模糊化描述。

表1 K_p 模糊调节量控制

Table 1 Control of K_p fuzzy adjustment

		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 模糊调节量控制
Table 2 Control of K_i fuzzy adjustment

		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 模糊调节量控制
Table 3 Control of K_d fuzzy adjustment

		e_c						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3 基于 Matlab 的 PID 参数模糊自整定模型仿真试验

将模糊逻辑控制器引入已建立的 PID 控制器的 Simulink 仿真模型,使传统 PID 控制器拥有参数能够进行在线调整的功能,则实现了 PID 参数模糊自调节. PID 参数自整定控制器仿真模型如图 3 所示.

3.1 输入适应性对比试验

由于传统 PID 控制的局限性,其不可能使系统在各个给定条件下都有好的响应特性,而 PID 参数模糊自调节控制器能够在线调节 PID 参数,则可以自动整定参数,使响应特性仍保持良好. 因此试验设计了对多种给定电流参数的对比. 试验条件为峰值时间与基值时间不变均为 2 ms,不断改变峰值与基值电流的数值给定,按照设计进行试验可得如图 4 所示试验波形,并归纳出试验见表 4.

由试验波形可以看出,传统方法所用 PID 参数是在给定基值 500 A,给定峰值为 3 000 A 时采用试凑法进行整定的,因此虽然其在此给定点附近的响

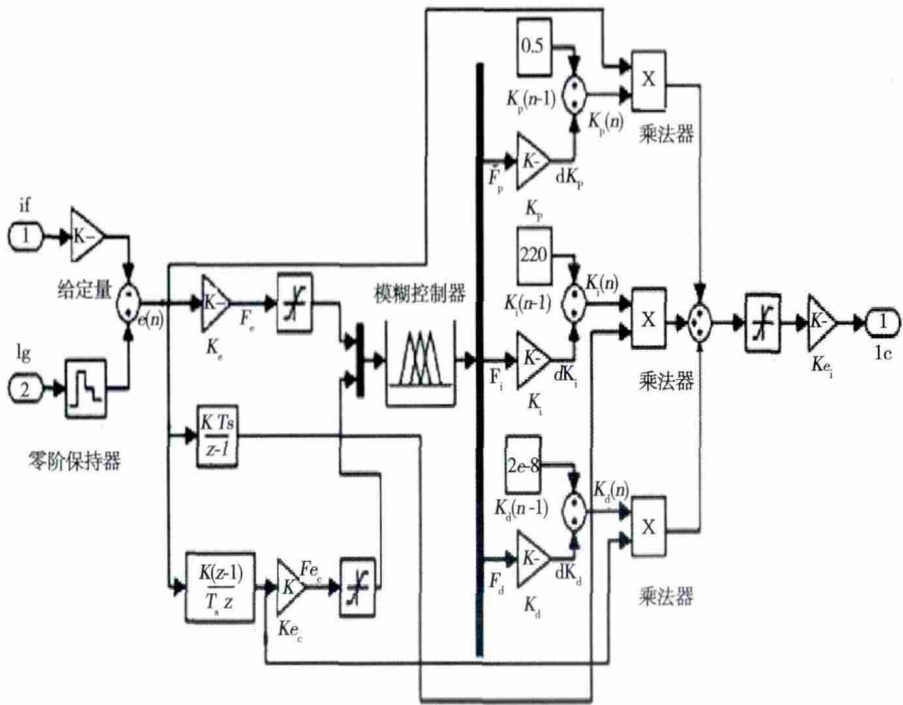


图 3 PID 参数自整定控制器仿真模型
Fig. 3 Simulation model of PID parameter self-tuning controller

应比较好,但是随着给定电流范围的扩大,系统的动、静态响应都逐渐变差. 稳态响应的线性度降低,动态响应出现了超调,甚至失控的现象;而 PID 参数模糊自整定控制器的加入使系统的响应更为稳定.

由表 4 中对系统响应的稳态数据可以看出,多种给定值条件下系统稳态响应的精确度和线性度非常好,相差在 ± 5 A 之内;动态响应相当稳健,不会因给定值的变化出现超调量突然变大,响应速度变慢

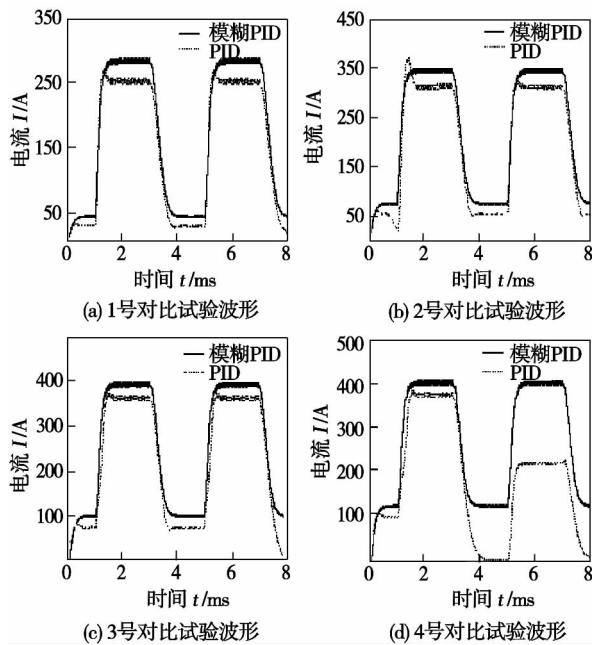


图4 输入适应性试验对比波形

Fig. 4 Contrast of input adaptability test waveforms

表4 输入适应性试验参数对比

Table 4 Contrast of input adaptability test parameter

试验 编号	给定 基值 电流 I_b / A	给定 峰值 电流 I_p / A	模糊控 制器基 值电流 I_{bf} / A	模糊控 制器峰 值电流 I_{pf} / A	普通控 制器基 值电流 I_{bp} / A	普通控 制器峰 值电流 I_{pp} / A
1	200	2 000	40	285	25	250
2	400	2 500	75	345	50	310
3	600	3 000	108	400	82	370
4	800	3 200	142	422	110	392

或失控等现象. 由此可以说明 PID 参数模糊自整定控制器较传统 PID 控制器, 由于引入了对 PID 参数的在线调节, 能在更宽的输入范围内对系统进行有效控制.

3.2 抗干扰试验

对基于 PID 控制的系统而言, 抗干扰能力也是评价系统是否稳定的重要指标. 传统 PID 控制器相对于开环系统而言提高了系统的抗干扰能力和响应特性; 但是如果在 PID 参数整定的过程中, 对噪声与干扰的影响不加考虑, 所整定的 PID 参数在理想情况下能够对系统实施较好的控制, 但在引入干扰后便不再有理想的控制效果. 而这也是用试凑法进行 PID 参数整定设计周期较长、较为困难的原因. 而 PID 参数模糊自整定控制器由于具有参数自调节的能力, 因此可以依据在控制过程遇到的干扰量在线调整当时的 PID 参数, 可以认为在任意时刻的 PID 参数都经过了对具体情况进行判断后的优化, 其抗

干扰能力应该比固定 PID 参数控制器更强.

为测试两种控制器的抗干扰能力, 在仿真模型的输出反馈量采样信号中加入平均值为 0, 方差为 20 的高斯噪声, 对比观察其系统响应. 在基值电流给定 500 A, 峰值电流给定 3 000 A 的输入信号中加入噪声后系统的响应情况, 如图 5 所示. 图 5a 为无噪声引入时系统采用不同控制器的响应, 可以看到系统响应均很理想, 说明在无噪声情况下 PID 参数整定已比较准确. 图 5b 为引入噪声后系统采用不同控制器的响应. 虽然传统 PID 控制器仍能起到一定的控制作用, 对脉冲焊接方法中电流各阶段的控制仍然较清晰, 但其控制的超调量较大, 调整时间与恢复时间明显无法达到焊接的快速性理想要求. 而噪声的引入对 PID 参数模糊自整定控制器系统响应的影响却不大, 体现出很强的抗干扰能力.

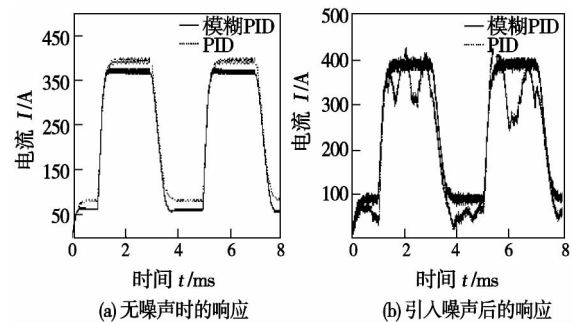


图5 两种控制器抗干扰试验波形对比

Fig. 5 Contrast of anti-interference test waveforms

图 6 分别是在输入适应性对比试验的 2 号与 3 号给定情况下, 引入噪声的系统响应对比. PID 参数模糊自整定控制器响应出现了较前一试验超调量变大与多峰上升的现象, 这主要与 PID 参数设置的初始值有关, 在无噪声时 PID 参数选择得越准确, 系统传递函数在 PID 参数变化的情况下收敛的速度越快, 模糊规则对 PID 参数调节到理想状态需要的时

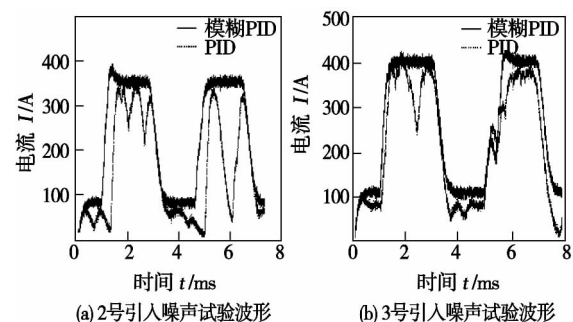


图6 抗干扰试验波形

Fig. 6 Anti-interference test waveforms

间越短;反之,无噪声时 PID 参数选择得越不准确,则即使采用 PID 参数模糊自整定技术也可能无法快速整定出理想的 PID 控制参数. 因此说明对无噪声状态下对 PID 参数的选择对于 PID 参数的模糊控制仍有意义.

4 焊接试验结果分析

试验条件为铝合金薄板母材厚度 1 mm,采用直径 1.2 mm ER1070 铝焊丝,保护气为 99.9% 高纯氩气,气体流量为 14 L/min,焊丝伸出长度为 15 mm,平板堆焊,焊接行走机构速度为 60 cm/min. 试验参数为峰值时间 1.9 ms,对应最小峰值电流 187 A;基值-峰值时间比 $k=9$,基值时间 17.1 ms,基值电流 25 A,电流振幅取 10 A,脉冲个数 $N=11$,其低频调制频率为 4.8 Hz 左右,平均电流约 52 A 左右,焊接行走机构速度设定为 70 cm/min. 分别采用传统 PID 控制和模糊自整定参数 PID 控制进行试验,其焊缝形貌如图 7 所示.

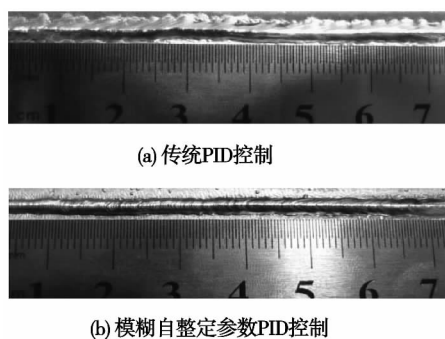


图 7 两种控制方式的铝合金薄板焊缝形貌

Fig. 7 Aluminum alloy sheet weld photos with two kinds of control methods

图 7a 采用传统 PID 控制,其参数是采用试凑法进行整定的,在给定点附近响应较好,但随着给定电流范围的扩大,系统的动静态响应都逐渐变差,如图 7a 所示初始阶段焊缝并不理想,随着 PID 参数的稳定及干扰的减少焊缝逐渐变得较均匀. 图 7b 采用模糊自整定参数 PID 控制,由于引入了对 PID 参数的在线调节,能在更宽的输入范围内对系统进行有效控制,其焊缝粗细均匀、细纹明显、熔深稳定、表

面光洁、飞溅较少、无明显焊接缺陷,表明焊接质量较好.

5 结 论

(1) 对 PID 控制和模糊自整定参数 PID 控制进行了输入适应性和抗干扰方面的对比试验,结果表明 PID 参数模糊自整定控制器在输入适应性和抗干扰方面效果更好,能进一步提高弧焊电源性能.

(2) 对铝合金 1 mm 薄板进行脉冲焊接工艺试验,焊缝光亮、焊缝飞溅较少、焊接过程比较平稳,获得较好的焊缝质量和稳定的焊接过程.

参考文献:

- [1] 张文毓. 铝合金焊接技术研究进展 [J]. 轻金属, 2010, 36(4): 53-56.
Zhang Wenyu. Aluminum alloy welding engineering research progress [J]. Light Metal, 2010, 36(4): 53-56.
- [2] 左敦桂, 李 芳, 华学明, 等. 铝合金焊接新技术在汽车制造中的应用 [J]. 电焊机, 2007, 37(7): 1-7.
Zuo Dungi, Li Fang, Hua Xueming, et al. New welding technology of aluminium alloy in auto industry [J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(7): 1-7.
- [3] 李思奇, 吴志生, 郭建业, 等. 智能化逆变弧焊电源控制策略现状及发展趋势 [J]. 焊接技术, 2011, 40(6): 1-3.
Li Siqi, Wu Zhisheng, Guo Jianye, et al. Development situation and status of the technology of intelligent inverter arc welding power control [J]. Welding Technique, 2011, 40(6): 1-3.
- [4] Cominos P, Nurro N. PID controller: recent tuning methods and design to specification [J]. Control Theory and Applications, 2002, 149(1): 46-53.
- [5] Huang X X, Gu W, Shi F H, et al. An adaptive inverse control method based on SVM-fuzzy rules acquisition system for pulsed GTAW process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(7/8): 686-694.
- [6] Ganjigatti J P, Pratihari D K. Forward and reverse modeling in MIG welding process using fuzzy logic-based approaches [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2008, 19(2): 115-130.

作者简介: 张晓莉,女,1978 年出生,博士研究生,讲师. 主要从事智能检测智能控制方面的科研和教学工作. 发表论文 20 余篇.

Email: zxlxkh@126.com

通讯作者: 薛家祥,男,教授. Email: mejiaxue@scut.edu.cn

National Engineering Research Center for Commercial Aircraft Manufacturing, Shanghai 200436, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 73 – 77

Abstract: The behavior characteristics of wire melting and fiber laser beam welding process of aluminum alloys with filler wire were carried out by using high-speed camera and experimental tests. The filler wire melting behavior and its main influencing factors were analyzed. The effect of wire feeding mode and wire feeding angle on weld formation and welding process stability were also studied. The results show that the melting behavior, which mainly depends on the distance between laser incident position and filler wire, can be divided into three types: the spreading transfer, the liquid bridge transfer and the globular transfer, and the liquid bridge transfer is the ideal type. The mode of pre-wire has higher efficiency and wider process window. The level of laser energy absorption by wire and the impact force of liquid wires on the liquid weld pool are affected by the wire feeding angle. The back weld width increases obviously with increase of wire feeding angle, while the weld penetration keeps essentially invariable.

Key words: laser technique; melting dynamics; high-speed camera; aluminum alloys; wire parameters

Geometry quality prediction of Ni-based superalloy coating by laser cladding based on neural network and genetic algorithm YANG Youwen¹, TIAN Zongjun¹, PAN Hu¹, WANG Dongsheng^{1,2}, SHEN Lida¹ (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Tongling College, Tongling 244000, China). pp 78 – 82

Abstract: Combination of back-propagation (BP) artificial neural network (ANN) and genetic algorithm was used to set up genetic neural network model to predict the quality of laser cladding layer according to the laser power, powder feed rate and scan rate. An orthogonal test was designed to obtain the training data of prediction model, and then the influence of different process parameters on the cladding layer geometry quality was analyzed by the method of range analysis. The validation results show that the relative error between predicted values and experimental data is less than 4.6%, which indicated that the use of the model can accurately select cladding parameters to improve the geometry quality of the laser cladding layer of nickel-based superalloy.

Key words: laser cladding; geometry quality; artificial neural networks; genetic algorithms; range analysis

Pulsed MIG welding of aluminum alloy sheet based on fuzzy self-tuning PID control ZHANG Xiaoli^{1,2}, LI Yuzhen¹, LONG Peng¹, XUE Jiayang¹ (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Mechanical and Elec-

trical Engineering, Jiangxi University of Science & Technology, Ganzhou 341000, China). pp 83 – 87

Abstract: A fuzzy self-tuning PID control method was proposed for pulsed MIG welding of aluminum alloy sheet. The principle and design ideas were introduced. Fuzzy self-tuning PID parameter was implemented by introducing the fuzzy logic controller into the established Simulink model of PID controller. Then input adaptability experiment contrast and anti-interference test were conducted and analyzed. It shows that fuzzy self-tuning controller in input adaptability and anti-interference is better and the arc welding power performance can be further improved. Finally the contrast of welding experiments on 1 mm thickness aluminum alloy between traditional PID control and fuzzy self-tuning parameter PID control were carried out. The experiments result shows that high welding quality and stable welding process with good weld seam, less welding spatter, relatively smooth welding process are achieved by the proposed method.

Key words: aluminum alloy sheet; PID control; fuzzy self-tuning; MIG welding

Microscopic feature of TC4 linear friction welded joints

ZHU Jianqiao¹, ZHANG Yanhua¹, ZHANG Tiancang², SUN Chengbin² (1. Teaching and Research Section 702, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Research Section 102, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). pp 88 – 92

Abstract: Microscopic features of TC4 linear friction welded joints were analyzed and the variation of the characteristic parameters with welding time was studied. The results indicated that the joint interface includes the welded zone, the transition zone and the incomplete bonding zone. Fine dynamic recrystallization grains appeared in the welded zone where the joint interface fused completely. Micro pores formed in the transition zone where the joint interface fused partly. In the incomplete bonding zone, metals on both sides of the joint interface were not contacted and grains were out of distortion. Moreover, metal fragments developed in the joint interface. Three-branch structure forms in the joint interface due to the separation of the vibration direction flash and the vertical vibration direction flash. Friction pressure and upsetting pressure are inclined to close the branches, while friction shear force attributes for expanding the branches.

Key words: linear friction welding; microscopic feature; micro pore; three-branch structure

Computational method for deformation of T joint welded by double beam laser

WANG Xuedong, HE Enguang, QIAN Hongli (Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). pp 93 – 96

Abstract: The computational method of deformation of T joint of aluminum-Li alloy with thickness of 2.5 mm welded by double beam laser was studied. By taking account of the change of mechanical characteristics of the weld metal in heating, melting, cooling and solidifying process, and the forming process of the T joint, a method of calculating the deformation of T joint